

# Tracking und Datenfusion im urbanen Fahrzeugumfeld

Jan Effertz

Institut für Regelungstechnik

TU-Braunschweig

Hans-Sommer-Straße 66

Tel. 0531 391 3812

Fax 0531 391 5194

[effertz@ifr.ing.tu-bs.de](mailto:effertz@ifr.ing.tu-bs.de)

## 1 Einleitung

Die künstliche Modellierung der Fahrzeugumgebung ist die Grundlage für moderne Fahrerassistenzsysteme, die eine direkte Interaktion mit dem Fahrzeugumfeld erfordern. Eine Reihe dieser Systeme befindet sich gegenwärtig im Stadium der Markteinführung oder ist bereits Serienstandard, beispielsweise der Spurwechselassistent oder erste Realisierungen einer unterstützten Notbremsfunktion. Die Anwendungen konzentrieren sich dabei überwiegend auf außerstädtische Umgebungen, die aufgrund der begrenzten Situationskomplexität durch gängige Sensorsysteme und Auswertestrategien bereits zufriedenstellend beherrschbar sind. Die Komplexität innerstädtischer Umgebungen stellt jedoch neue Herausforderungen an die Umfeldmodellierung, da aufgrund der Vielzahl der verschiedenen für die Fahrzeugführung relevanten Umfeldbestandteile (z.B. Randbebauung, blockierte Straßen oder parkende Fahrzeugkolonnen) entsprechend komplexere Umfeldmodelle herangezogen werden müssen. Einzelsensorsysteme sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht in der Lage, allen Anforderungen einer Umfelderkassung in dieser Komplexitätsstufe gerecht zu werden, was zu einer notwendigen Kombination verschiedener Sensorsysteme und einer nachgeschalteten Sensorfusion führt.

Das künstliche Umfeldmodell selbst ist dabei die Basis des Erfassungssystems und beeinflusst direkt sowohl die Auswahl der notwendigen Sensoren als auch die Auswahl geeigneter Fusionsalgorithmen. Eine weit verbreitete Vorgehensweise ist hierbei die Modellierung des Umfeldes auf Basis einer digitalen Karte, für deren Struktur zwei prinzipielle Ansätze bestehen<sup>1</sup>:

- Erfolgt die Indizierung der Karte über die im Umfeld erfassten Merkmale, so wird von einer merkmals- oder objektbasierten Kartendarstellung gesprochen. Die in die künstliche Fahrzeugumgebung aufgenommenen Umfeldbestandteile werden dazu durch diskrete Objekte beschrieben und müssen örtlich klar abgrenzbar, eindeutig identifizierbar und durch entsprechende Objektprimitive beschreibbar sein. Beispiele hierfür sind die Beschreibung von Fahrspurmarkierungen durch geeignete Polynomapproximationen oder die Modellierung fremder Fahrzeuge durch eine einhüllende Quaderdarstellung. Die Sensordaten werden in diesem Fall genutzt, um die einzelnen Parameter des Objektmodells abzuschätzen und die Objekte im Rahmen eines Trackings über die Zeit zu verfolgen. Die resultierenden Objektlisten mit allen Bestandteilen der künstlichen Fahrzeugumgebung werden dann der übergeordneten Applikation übergeben und auf Basis einer Situationsanalyse für die Fahrzeugführung genutzt.
- Erfolgt die Indizierung der Karte über die Lage der Merkmale im Beobachtungsbereich, so spricht man von einer ortsbasierten Kartendarstellung. Das Fahrzeugumfeld wird dazu als ganzes in äquidistante Teilelemente zerlegt, und jedem Element ein sogenannter Merkmalsraum zugewiesen. Ein möglicher Merkmalsraum ist dabei die Klassifizierung der Teilbereiche in die Gruppen Straße, Randbereich,

Hindernisse etc. Der wesentliche Unterschied zur objektbasierten Kartendarstellung liegt in der gleichförmigen Beschreibung der gesamten Umgebung, es werden also auch Bereiche abgedeckt, in denen durch die Sensorsysteme keine relevanten Merkmale entdeckt wurden. Es erfolgt so eine direkte Modellierung des freien Bereiches im Fahrzeugumfeld, was im objektbasierten Ansatz prinzipiell nicht durchführbar ist. Verknüpft man den Merkmalsraum mit einer probabilistischen Komponente für die Beschreibung der Wahrscheinlichkeit einzelner Merkmale, so lässt sich auf diese Weise eine probabilistisch gewichtete Kostenfunktion für jedes Rauminkrement erzeugen.

Zum aktuellen Stand der Technik werden überwiegend objektbasierte Karten im Bereich der Fahrerassistenzsysteme eingesetzt<sup>2,3</sup>, da die einfache Beschreibung des Umfeldes auf Basis von Objektlisten eine erhebliche Datenreduktion mit sich bringt und so die praktische Realisierung auf in der Automobilindustrie üblichen Kommunikationsnetzen und Rechnersystemen ermöglicht. Ortsbasierte Karten hingegen finden im Bereich der autonomen mobilen Kleinroboter weiträumig und erfolgreich Anwendung<sup>4</sup>. Aufgrund der genannten Vorteile ist ihre Übertragung auf den automobilen Bereich Bestandteil einiger Forschungsaktivitäten.

Beide Varianten haben auch einige Nachteile. Objektbasierte Karten sind abhängig von der eindeutigen Separierbarkeit der durch die Sensoren ermittelten Messdaten, um diese den modellierten Bestandteilen der Fahrzeugumgebung zuordnen zu können. Unscharfe Sensordaten führen oftmals zu zusätzlichen, real nicht existenten Objekten im Umfeldmodell (Geisterziele), so dass der Plausibilisierung von Mess- und späteren Objektdaten eine große Verantwortung zukommt.

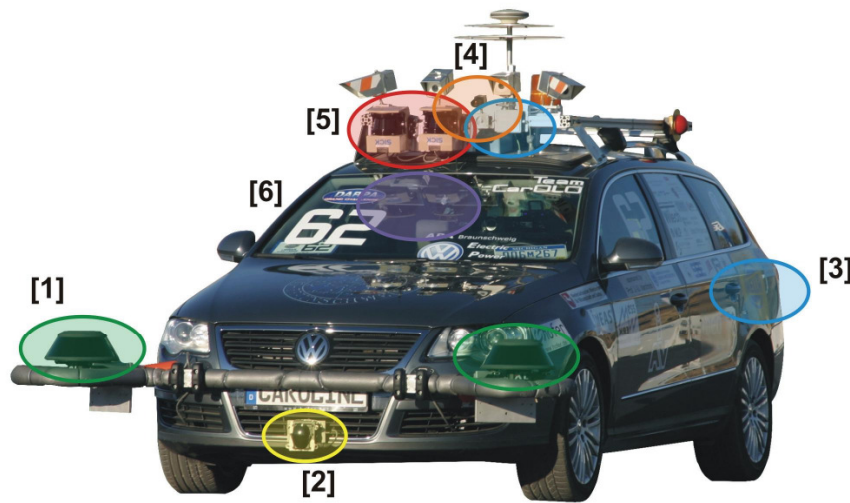
Ortsbasierte Karten hingegen sind nur schwer für die Beschreibung dynamischer Prozesse nutzbar. Für eine Modellierung dynamischer Vorgänge muss die Karte selbst dynamisch werden, was bei einem Wechsel von einem Zeitpunkt auf den Nächsten zunächst eine Aktualisierung der gesamten Karte erfordert. Weiterhin müsste für eine korrekte Betrachtung der Dynamik die Kartendimension erweitert werden (z.B. Orts-Geschwindigkeits-Raum). Dies treibt den notwendigen Speicherbedarf sowie die Rechenkomplexität gegenwärtig noch in Bereiche, die eine Echtzeitanwendung unmöglich machen.

Im Rahmen der Teilnahme der TU-Braunschweig an der DARPA Urban Challenge 2007 wurde am Institut für Regelungstechnik ein hybrides Umfeldfassungssystem entwickelt, dass beide Modellansätze in einem Gesamtsystem kombiniert, um die Vorteile beider Verfahren für die Fahrzeugführung nutzbar zu machen. Grundlage ist zum einen eine objektbasierte Beschreibung klar identifizierbarer Hindernisse anhand eines dynamischen Objektmodells. Zum anderen wird die Erkennung des Straßenverlaufes sowie dessen Unterteilung in befahrbare und nicht befahrbare Bereiche auf Basis einer ortsbasierten Kartendarstellung gelöst. Die Befahrbarkeit der Umgebung wird als örtlich statisches Merkmal aufgefasst. Da die im Umfeld messbaren Merkmale für eine Befahrbarkeitsanalyse oft nicht eindeutig sind und daher eines statistischen Ansatzes bedürfen, ist die probabilistische Umfeldmodellierung auf Basis ortsbasierter Karten für eine Darstellung besonders eignet.

Im Rahmen dieses Beitrages wird das objektbasierte Teilsystem des Versuchsfahrzeuges beschrieben: Weiterhin werden einzelne Elemente der ortsbasierten Kartendarstellung erwähnt, um durch Kombination beider Ansätze Verbesserungsmöglichkeiten in der Objektdarstellung aufzuzeigen.

## 2 Sensorsystem

Für die Erfassung der notwendigen Umfelddaten kommt ein Multi-Sensor-System zum Einsatz, bei dem Laser-, Radar- und Kamerasysteme in einem gemischt redundant/komplementären Beobachtungsbereich betrieben werden:



**Abbildung 1: Sensorkonzept**

- Zwei Laserscanner vom Typ IBEO Alasca XT ([1] in Abbildung 1) sowie ein Scanner vom Typ IBEO ML sind an Fahrzeugfront und -heck verbaut und dienen der Erfassung statischer und dynamischer Hindernisse im nahen und mittleren Entfernungsbereich bis ca. 80 Meter. Durch die Verbauposition wird ein horizontaler Öffnungswinkel von nahezu 360 Grad erreicht, mit durch die Fahrzeugkarosserie verursachten Totbereichen nach schräg rechts und links hinten. Jeder Scanner ist durch vier vertikal übereinander angeordnete Scanebenen mit einem zusätzlichen vertikalen Öffnungswinkel von 3,2 Grad begrenzt fähig, kleinere Nickbewegungen der Fahrzeugkarosserie auszugleichen
- Zwei Lidarsensoren der Fa. Hella ([2] in Abbildung 1) sind zentral an Fahrzeugfront und -heck im Einsatz. Sie erweitern den Erfassungsbereich nach vorne und hinten bis auf 200 Meter in einem horizontalen Öffnungswinkel von 12 Grad. Durch die Strahlfokussierung wird ein vertikaler Öffnungswinkel von ca. 3 Grad erreicht, dennoch verbleiben auch hier Einschränkungen im Bereich starker Nickbewegungen oder größerer Bodenwellen bzw. Steigungsunterschieden des Geländes.
- Insgesamt vier 24 GHz Radarsensoren ([3] in Abbildung 1) der Fa. SMS kommen zum Einsatz, um zentral nach vorne und hinten sowie als Blind-Spot Detektor schräg nach rechts und links hinten die übrigen Sensorsysteme zu unterstützen und die Redundanz des Sensorsystems zu erhöhen. Die zentral ausgerichteten Radarsensoren können ankommende Fahrzeuge bis zu einer Reichweite von 150 Metern und in einem horizontalen Öffnungswinkel von ca. 40 Grad erfassen. Damit wird eine Verbreiterung des Sichtbereiches entlang der Fahrzeuglängsachse über die Reichweite der Laserscanner hinaus erzielt. Die Blind-Spot-Detektoren im Fahrzeugheck schließen den toten Winkel, der sich durch die Verbauposition der Laserscanner ergibt.
- Eine Farbkamera der Fa. IDS ([4] in Abbildung 1) wird eingesetzt, um die Farbeigenschaften des Straßenverlaufs zu analysieren und darauf aufbauend eine bildbasierte Befahrbarkeitsabschätzung vorzunehmen.
- Zwei industrieübliche Laserscanner der Fa. Sick ([5] in Abbildung 1) werden eingesetzt, um den dreidimensionalen Verlauf der Fahrbahnebene vor dem Fahrzeug abzutasten.

- Ein Stereokamerasystem der Volkswagen Konzernforschung ([6] in Abbildung 1) wurde zu einem späteren Zeitpunkt integriert und wird ebenfalls für die Analyse des Fahrbahnverlaufs herangezogen.

Analog zur Konzeption des Gesamtsystems als hybrides Umfelderkennungssystem bestehend aus objektbasierter und ortsbasierter Darstellung lassen sich die verwendeten Sensoren in zwei Gruppen einteilen:

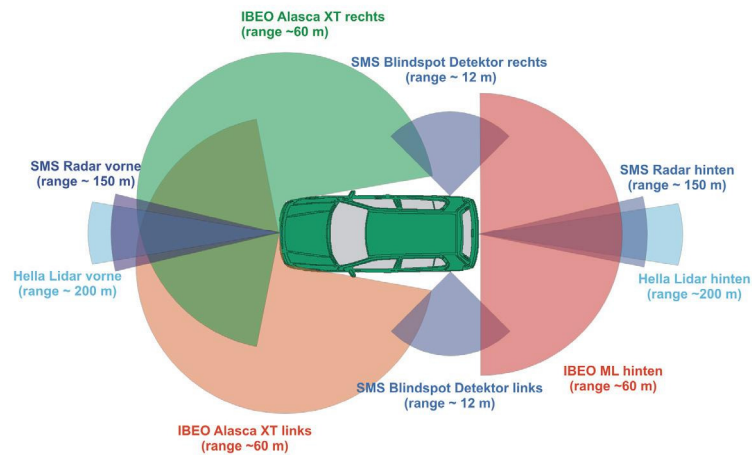
Für das objektbasierte Umfeldmodell werden die IBEO-Laserscanner, die Hella Lidarsensoren sowie das SMS-Radarsystem verwendet. Die Sensoren stammen aus dem Bereich herkömmlicher Fahrerassistenzapplikationen und weisen eine interne Datenvorverarbeitung auf, so dass die Ausgangsdaten in der für eine objektbasierte Weiterverarbeitung geeigneten Objektlistenform zur Verfügung stehen. Aufgrund der unterschiedlichen Messprinzipien ergeben sich drei unterschiedliche Zieldarstellungen:

- Die Radarsensoren beschreiben erfasste Ziele durch einen Orts- und zugeordneten Geschwindigkeitsvektor. Das Ergebnis ist ein punktförmiges Objektmodell, dass keine Aussagen über die tatsächliche Form des Ziels zulässt.
- Das Lidar-System ist in der Lage, Ziele durch mehrere Laserkanäle hindurch zusammenzufassen, so dass sich eine linienförmige Zieldarstellung mit Position und Zielbreite ergibt. Die Sensoren liefern zwar zusätzlich eine Abschätzung der Zielgeschwindigkeit, die jedoch maßgeblich auf einer Differenzierung der Zielposition beruht und daher nur von geringer Güte ist.
- Die Laserscanner sind in der Lage, komplexe Zielkonturen aufzulösen und verwenden als Objektmodell eine Reihe von Konturpunkten mit gemeinsamem Geschwindigkeitsvektor, der wiederum aus einer Differenzierung der Positionsvektoren hervorgegangen ist.

Aufgrund der Sensorherkunft aus dem automobilen Serien- oder Vorserienbereich sind diese ausgestattet mit einer CAN-Bus-Schnittstelle für die Übermittlung der Objektdaten. Wegen der Limitierungen dieses Bussystems hinsichtlich Bandbreite und Determinismus wurde beim Fahrzeugentwurf ein privater CAN-Bus je Sensor vorgesehen. Durch die vergleichsweise geringe Fahrgeschwindigkeit im Rahmen des Wettbewerbs (max. 50 km/h) können die durch Bus- und Sensorsystem verursachten Messlatenzen weitgehend vernachlässigt werden.

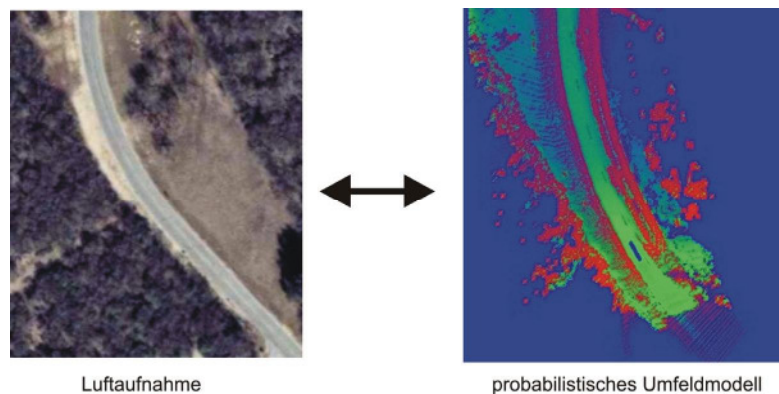
Unter Berücksichtigung der Sensoranordnung am Fahrzeugträger ergibt sich der in Abbildung 2 dargestellte Beobachtungsbereich.

Die hohe Redundanz des Sensorsystems im vorderen und hinteren Sichtfeld ist beabsichtigt und wird im übergeordneten Tracking für eine effektive Plausibilisierung der Messdaten im Rahmen einer Zielinitialisierung (Pretracking) genutzt.



**Abbildung 2: Beobachtungsbereich merkmalsbasiertes Teilsystem**

Die übrigen in Abbildung 1 dargestellten Sensorsysteme werden für die ortsbasierte Befahrbarkeitsanalyse herangezogen. Merkmalsraum ist eine Klassifikation in die Gruppen *befahrbar*, *unbefahrbar* und *unbekannt*, deren Wahrscheinlichkeit durch ein probabilistisches Modell auf Basis der Dempster-Shafer Evidenztheorie<sup>5</sup> beschrieben wird. Anhand dieser Darstellung lässt sich der Straßenverlauf rekonstruieren und für eine Unterstützung der Fahrzeug-Querführung nutzen.



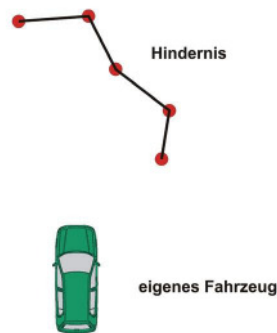
**Abbildung 3: Probabilistisches, ortsbasiertes Umfeldmodell**

Die Messdaten der Laserscanner sowie des Stereokamerasystems werden genutzt, um eine dreidimensionale Höhenkarte des Fahrzeugumfeldes aufzubauen. Die Gradienten dieser Höhenkarte werden fusioniert mit der Monokamera basierten Farbanalyse des Fahrzeugumfeldes, so dass sich eine Darstellung gemäß Abbildung 3 ergibt, wobei hier blau den unbekannten Bereich, rot die Unbefahrbarkeit und grün die Befahrbarkeit angibt.

### 3 Objektbasierte Umfeldmodellierung

Die Wahl geeigneter Objektprimitive ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung objektbasierter Umfeldsysteme. Die in der Literatur beschriebenen und für gängige Assistenzsysteme verwendeten Objektprimitive legen die Form der modellierbaren Ziele bereits stark fest (z.B. einhüllender Quader für Erfassung von Fahrzeugen). Für den Einsatz in urbanen Umgebungen ist diese Vorgehensweise nur bedingt geeignet, da prinzipiell

verschiedenartige Zieltypen gleichzeitig erfasst werden müssen. Es wäre theoretisch möglich, eine geeignete Primitivendatenbank anzulegen und für jede Messung das beste Modell auszuwählen. Dies würde jedoch neben zusätzlichem Rechenaufwand eine neue Zuordnungsproblematik im Rahmen der Trackinitialisierung bedeuten. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass bereits aus den ersten Messungen eines Ziels eine korrekte Modellauswahl erfolgen kann. Auch die Modellierung entsprechender Primitivenwechsel während der Erfassungsdauer eines Ziels ist hier problematisch. Aus diesen Gründen wird in der vorliegenden Applikation ein generellerer Ansatz zur Objektmodellierung gewählt, bei dem die Objektform durch eine beliebige Anzahl von Konturpunkten definiert wird, die über einen Polygonzug verbunden sind (Abbildung 4). Das Objekt kann so über die Beobachtungsdauer auf Basis der eingehenden Messdaten nicht nur seine Position, Geschwindigkeit etc. sondern auch grundlegende Formparameter ändern, um eine bestmögliche Verfolgung zu gewährleisten.



**Abbildung 4: Objektmodell**

Die vertikale Komponente der erfassten Objekte wird für die eigentliche Parameterschätzung zunächst vernachlässigt, da keines der eingesetzten Sensorsysteme einen nennenswerten vertikalen Öffnungswinkel für die Erfassung entsprechender Höhendaten aufweist. Dies führt zu einem ebenen Umfeldmodell, dass im Bereich von Geländeabschnitten mit starken Höhenunterschieden Einschränkungen unterworfen ist, was im Rahmen von Kapitel 5 diskutiert wird.

Für die Beschreibung der Objektdynamik werden zwei mögliche Bewegungsmodelle verwendet, wobei davon ausgegangen wird, dass sich das Ziel als starrer Körper bewegt und daher alle Konturpunkte die gleichen Dynamikparameter tragen. Schnelle, hochdynamische Ziele stellen im urbanen Umfeld zumeist andere Fahrzeuge dar, welche sich aufgrund ihrer radgeführten Fortbewegung unter Vernachlässigung der fahrdynamischen Vorgänge im Kleinen grob angenähert auf Kreisbahnen bewegen. Es ergibt sich dadurch eine Verkopplung der Bewegung in Längs- und Querrichtung, welche geeignet modelliert werden muss. Eine zusätzliche Berücksichtigung der Beschleunigung führt zu folgendem Objektzustandsvektor,

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_{1..N} \\ y_{1..N} \\ v \\ a \\ \alpha \\ \omega \end{pmatrix}, \quad (1)$$



mit  $x_i$  und  $y_i$  als Position des  $i$ -ten Konturpunkts,  $v$  als Betrag der gemeinsamen Geschwindigkeit,  $a$  als Beschleunigung,  $\alpha$  als Kurswinkel und  $\omega$  als Kurswinkelgeschwindigkeit. Dem gegenüber steht ein reduziertes Bewegungsmodell für langsame oder quasistationäre Ziele, mit

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_{1..N} \\ y_{1..N} \\ v_x \\ v_y \end{pmatrix}, \quad (2)$$

wobei  $v_x$  und  $v_y$  die entkoppelten Geschwindigkeitskomponenten in X- und Y-Richtung darstellen. Die Beschreibung der Zustandsvektoren erfolgt in einem erdfesten Koordinatensystem, die Bewegung der eigenen Fahrzeugplattform wurde bereits kompensiert. Es gilt für die Ableitung des Zustandsvektors

$$\dot{\underline{x}} = \begin{pmatrix} v \cdot \cos(\alpha) \\ v \cdot \sin(\alpha) \\ a \\ 0 \\ \omega \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{beziehungsweise} \quad \dot{\underline{x}} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

woraus sich die zeitdiskrete Übergangsfunktion

$$\underline{x}(k+1) = f(\underline{x}(k)) \quad (4)$$

ableiten lässt<sup>6</sup>, welche Grundlage für die Zustandsschätzung mit geeigneten Filteralgorithmen ist. Als Messvektor für die Sensoren wird analog

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} x_{1..M} \\ y_{1..M} \\ v_x \\ v_y \end{pmatrix} \quad (5)$$

definiert, wobei die Anzahl  $M$  der Konturpunkte durch den jeweiligen Sensortyp festgelegt ist (1 Punkt beim Radarsensor, 2 Punkte beim Lidar und bis zu 32 Punkte beim Laserscanner). Wird die Geschwindigkeitsangabe der Sensoren aufgrund ihrer ungenügenden Güte vernachlässigt, so verringert sich der Messvektor entsprechend in seiner Dimension. Messvektor und Zustandsvektor werden hier bereits in einem einheitlichen, erdfesten Koordinatensystem ausgedrückt, was eine entsprechende Transformation der Messobjekte notwendig macht. Die Einflüsse dieser Transformation auf die Kovarianzmatrix des Messrauschens  $\underline{R}$  müssen dabei abgebildet werden. Für die Transformation wird der Zustandsvektor des eigenen Fahrzeugs benötigt (Lage und Orientierung), wodurch zusätzliche Unsicherheiten in das System eingebracht werden. Dennoch ergeben sich für eine einheitliche Beschreibung aller Größen der Umfelderkassung im gemeinsamen erdfesten Koordinatensystem einige Vorteile:

- Stationäre Ziele erscheinen bezüglich ihres Geschwindigkeitsvektors als stationär, da dieser nicht in bezug auf das eigene Fahrzeug sondern auf das erdfeste Koordinatensystem ermittelt wird. Es ergibt sich ein intuitiver Zusammenhang zwischen Zielposition und Geschwindigkeit. Dies vereinfacht die Zustandsschätzung im angeschlossenen Tracking.
- Ein einheitliches Koordinatensystem für alle Umfelddaten eliminiert eine Reihe von Fehlerquellen bei der Entwicklung des Gesamtfahrzeuges, da nicht in jedem Funktionsmodul proprietäre, lokale Koordinatensysteme verwendet werden.
- Die Navigation des Fahrzeugs im Rahmen der Bahnplanung erfolgt auf Basis erdfester Wegpunkte. Eine Repräsentation der Umfelddaten ebenfalls im erdfesten Koordinatensystem liegt nahe und vermeidet unnötige Transformationen im Rahmen der Bahnplanung, deren Komplexität ohnehin an die Grenzen der Rechenressourcen stößt. Diese Transformation würde weiterhin die zusätzlichen Unsicherheiten lediglich eine Ebene weiter oben in das System mit einbringen, so dass sich kein größerer zusätzlicher Nachteil durch die Messdatentransformation im Vorfeld des Objekttrackings ergibt.

## 4 Architektur der Umfelderfassung

Das Erfassungssystem ist in drei Architekturebenen aufgeteilt. In der untersten Ebene steht die bereits vorgestellte Sensorhardware mit den zugeordneten Bussystemen für die Kommunikation. In der nächsten Ebene erfolgt die Erfassung und Strukturangleichung der Messdaten, um für die nachgeschaltete Sensorfusion eine einheitliche Softwareschnittstelle zur Verfügung zu stellen (Abbildung 5).

**Fehler! Kein Thema angegeben.**

**Abbildung 5: Struktur Datenerfassung**

Die Transformation der Messdaten in das erdfeste Bezugssystem erfolgt direkt im Rahmen der Akquisition und Umsetzung auf das durch den Messvektor in Gleichung (5) definierte Sensorobjektformat. Der dazu notwendige Fahrzeug-Zustandsvektor wird über das verbaute GPS/INS-System zur Fahrzeugortung akquiriert und per Netzwerk allen weiteren Funktionsmodulen zur Verfügung gestellt. Auf Basis des einheitlichen Messobjektmodells werden die Umfelddaten dann an die Sensorfusion übermittelt, die aufgrund des modularen und verteilten Systemcharakters sowohl lokal auf dem Erfassungsrechner als auch entfernt erfolgen kann.

Die einheitliche Sensordatenschnittstelle ermöglicht eine Implementierung der nachgeschalteten Sensorfusion losgelöst vom tatsächlich verwendeten Sensortyp, so dass Änderungen am Sensorkonzept rasch durchgeführt werden können und minimale Auswirkung auf die nachgeschaltete Algorithmik haben.

Die Fusion selbst erfolgt auf Basis eines seriellen Ansatzes. Die Sensordaten werden bei Empfang mit einem globalen Zeitstempel versehen (Zeitpunkt des Nachrichtenkopfes), der als Messzeitpunkt betrachtet wird. Auf Basis dieses Empfangszeitstempels werden die Sensorobjekte direkt in der Reihenfolge ihres Eintreffens dem nachgeschalteten Tracking zugeführt. Obwohl jedem Sensor ein privater CAN-Bus zugeordnet ist, kann durch die unterschiedlichen Zyklus- und Übertragungszeiten die Reihenfolge des zeitlichen Eingangs im Empfangspuffer des Trackingsystems gestört werden (Abbildung 6).



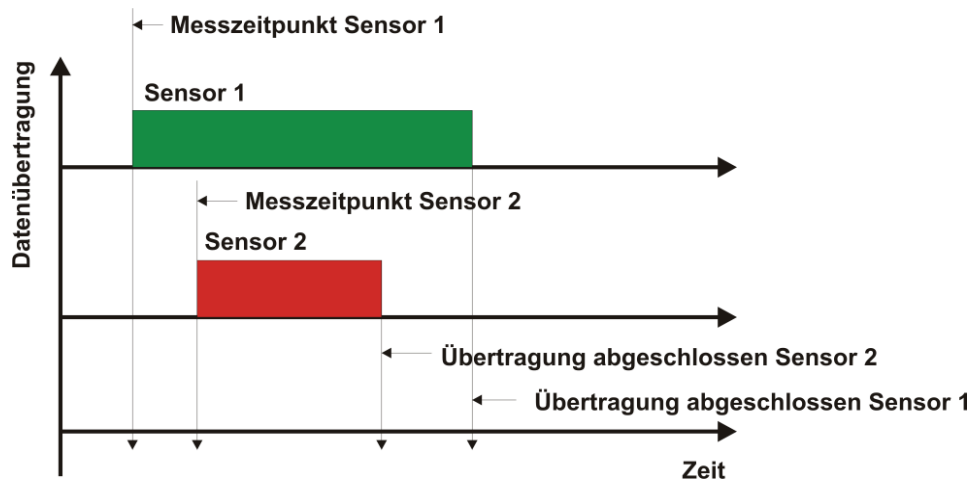


Abbildung 6: Störung der Objektreihenfolge durch unterschiedliche Kommunikationszeiten

In diesem Falle hat das Trackingsystem unter Umständen bereits zeitlich neuere Objektdaten für die modellierten Hindernisse verfügbar, als durch die nachfolgend eingegangenen Messdaten beschrieben wird. Geeignete Abhilfe schafft hier entweder eine Zwischenspeicherung der Messdaten mit anschließender Sortierung bezüglich des wahren Messzeitpunkts<sup>2</sup> oder alternativ eine Retrodiktio<sup>7</sup>, wobei Objekte neueren Zeitpunkts in die Vergangenheit zurück gerechnet werden, um den Informationsbeitrag älterer Messdaten nachträglich zu berücksichtigen. Beide Verfahren stellen keine optimalen Lösungen dar und sind in Zusammenhang mit den limitierten Determinismuseigenschaften des CAN-Bus sowie der meist unbekannten Eigenschaften der sensorinternen Vorverarbeitung zu sehen. Der Einsatz modernerer Bussysteme mit entsprechend hoher Bandbreite und eine deterministische Synchronisation der Sensoren ist hier wünschenswert.

Das Trackingsystem orientiert sich am klassischen Aufbau eines Zustandsschätzers<sup>8</sup>, der in die einzelnen Elemente Datenzuordnung, Zustandsschätzung, Trackinitialisierung und Trackverwaltung aufgeteilt ist (Abbildung 7).

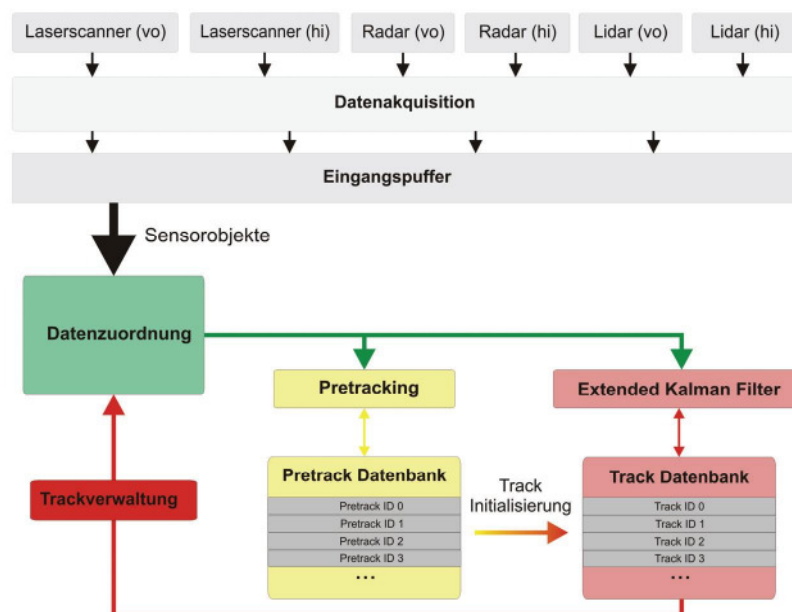


Abbildung 7: Struktur Tracking und Sensorfusion

## 4.1 Datenzuordnung

Im Rahmen der Datenzuordnung werden eingehende Sensordaten und vorhandene Objekte der künstlichen Fahrzeugumgebung (Tracks) abgeglichen, um für jeden Track die korrespondierende(n) Messung(en) zu ermitteln, die dann im Rahmen der Zustandsschätzung für eine Korrektur des Track-Zustandsvektors verwendet werden kann. Da aufgrund der Modellierung als Polygonzug theoretisch mehrere Objekte eines Sensors als Partner in Frage kommen, wird anders als bei ähnlichen Systemen eine Mehrfach-Zuordnung explizit zugelassen, so dass Tracks sequentiell durch mehrere Messungen eines Zyklus aktualisiert werden können. Für den Zuordnungsprozess wird die Definition eines Ähnlichkeitsmaßes zwischen Track und Messung benötigt. In klassischen Systemen wird hierfür der prädiizierte Zustandsvektor  $\underline{x}^*$  in den korrespondierenden Messvektor überführt,

$$\hat{y} = h(\underline{x}^*), \quad (6)$$

wobei die (nichtlineare) Ausgangsfunktion  $h()$  des Prozessmodells verwendet wird. Auf Basis einer Differenzbildung

$$\underline{e} = \underline{y} - \hat{y} \quad (7)$$

erfolgt dann der komponentenweise Vergleich zwischen Track und Messung, beispielsweise anhand fester Schwellwerte. Häufig wird auch die Varianz von Messung und Track bei der Zuordnung mit berücksichtigt, so dass unsichere Messungen und / oder Tracks auch einen entsprechend größeren Schwellwert mit sich führen. Hierfür eignet sich vor allem die normierte quadratische Innovation, die durch

$$i_n = \underline{e}^T \cdot \underline{S}^{-1} \underline{e} \quad (8)$$

gegeben ist. Hierbei ist  $\underline{S}$  die Kovarianzmatrix der Innovation, mit

$$\underline{S} = \underline{H} \cdot \underline{P} \cdot \underline{H}^T + \underline{R}, \quad (9)$$

wobei  $\underline{H}$  die Jacobi-Matrix der Systemausgangsfunktion ist sowie  $\underline{P}$  die Kovarianzmatrix der Zustandsschätzung.

Für die gewählte Objektmodellierung auf Basis beliebiger Polygone muss dieser Prozess angepasst werden. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Sensoren zu jedem Zeitpunkt Messwerte für alle Konturpunkte eines Tracks liefern können, so dass Mess- und Zustandsvektor unterschiedlich dimensioniert sind und daher eine Berechnung gemäß Gleichung (8) direkt nicht möglich ist. Es wird daher ein zweistufiger Zuordnungsprozess eingeführt.

In der ersten Stufe wird grob ermittelt, welche Messung für welchen Track in Frage kommt. Hierfür wird die minimale euklidische Distanz zwischen den Konturpunkten von Messung und Track ermittelt. Im Falle einer verfügbaren Geschwindigkeitsmessung wird dies erweitert durch den Differenzgeschwindigkeitsvektor, so dass sich folgende Darstellung für den Fehlervektor  $\underline{e}$  ergibt:

$$\underline{e} = \begin{pmatrix} \min[|\underline{x}_k^i - \underline{x}_l^j| \mid \forall k, l] \\ \underline{v}_x^i - \underline{v}_x^j \\ \underline{v}_y^i - \underline{v}_y^j \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Die Terme  $\underline{x}_k^i$  bzw.  $\underline{x}_l^j$  sind dabei die Positionsvektoren der Konturpunkte  $k$  und  $l$  von Messung  $i$  und Track  $j$ . Der Term wird anschließend über eine geeignete Kostenfunktion direkt

$$w_{i,j} = a \cdot \min[|\underline{x}_k^i - \underline{x}_l^j| \mid \forall k, l] + b \cdot |\underline{v}_i - \underline{v}_j| \quad (11)$$

oder über Berücksichtigung der Kovarianzen gemäß Gleichung (9) in ein skalares Gütemaß gewandelt, für das über eine Schwellwertdefinition die Zuordnung gesteuert werden kann. In der zweiten Stufe muss dann eine Zuordnung im Kleinen erfolgen, wobei die Konturpunkte des Messobjekts den Konturpunkten des Tracks auf Basis einer Eins-zu-Eins-Zuordnung zugewiesen werden. Hierzu wird eine Distanzmatrix  $\underline{\Omega}$  definiert, deren Elemente mit den euklidischen Distanzwerten aller möglichen Konturpunktskombinationen belegt werden.

$$\underline{\Omega} = \begin{bmatrix} |\underline{x}_1^i - \underline{x}_1^j| & \dots & |\underline{x}_1^i - \underline{x}_l^j| \\ \dots & \dots & \dots \\ |\underline{x}_k^i - \underline{x}_1^j| & \dots & |\underline{x}_k^i - \underline{x}_l^j| \end{bmatrix} \quad (12)$$

Die Optimierung dieser Matrix bezüglich einer Lösung, welche die geringsten Gesamtkosten verursacht, kann über gängige Algorithmen wie den Nearest-Neighbour oder den Munkres-Algorithmus<sup>3</sup> erfolgen. Ein Grenzwert für die maximale euklidische Distanz zwischen zwei Konturpunkten stellt sicher, dass völlig unpassende Paarungen im Vorfeld ausgeschlossen werden. Die übrig bleibenden Konturpunkte der Messobjekte sind Kandidaten für neue Konturpunkte des Tracks und werden dem Zustandsvektor angereichert. Ein Überwachungsalgorithmus sorgt dafür, dass alte Konturpunkte, für die keine Messungen mehr eingehen aus dem Track entfernt werden, um eine Überflutung durch inaktive Punkte zu vermeiden. Neu aufgenommene Konturpunkte werden hingegen zunächst als inaktiv mitgeführt und erst nach einer weiteren Bestätigung durch eingehende Messdaten tatsächlich in das Umfeldmodell aufgenommen.

## 4.2 Trackinitialisierung

Für die Trackinitialisierung werden alle Messobjekte verwendet, die im Rahmen der ersten Datenzuordnungsstufe keinem bestehenden Ziel in der künstlichen Fahrzeugumgebung zugeordnet werden konnten. Sie initialisieren zunächst einen sog. Pretrack, welcher auf Basis des reduzierten Bewegungsmodells aus Gleichung (2) mit Hilfe eines Standard-Kalmanfilters verfolgt wird. Die Pretracks haben eine einfache punktförmige Repräsentation. Bezugspunkt ist der dem Fahrzeug dichteste Konturpunkt. Da die Pretracks nur für die Plausibilisierung der Messdaten verwendet werden, ist dieses einfache Modell ausreichend. Jeder Pretrack trägt eine Zählerdatenstruktur, welche die Anzahl der Aktualisierungen durch die einzelnen Sensoren aufschlüsselt. Auf Basis dieser Zählerstände und unter Berücksichtigung der Sensorredundanz erfolgt dann die Aktivierung als realer Track mit vollständigem, polygonbasiertem Zustandsvektor. Eine einfache Pseudo-Sprache wurde entwickelt, um

abhängig von Lage im Beobachtungsbereich und dem Typ der beteiligten Sensoren konfigurierbare Schwellwerte zu erhalten. Ein Beispiel hierfür ist

```

polygon={0,2;10,2;10,-2;0,-2}

modifyCount=2000

condition=( RADARFront && !( LASERFront || LIDARFront ) ).

```

Dies bedeutet:

*„Aktiviere den Pretrack im durch das Polygon beschriebenen Areal erst, wenn 2000 Wiedererkennungen stattgefunden haben unter der Bedingung, dass nur der Radarsensor dieses Ziel sieht und nicht der Lidar oder die Laserscanner.“*

In diesem Fall wird eine Unterdrückung von Radargeistern direkt vor dem Fahrzeug bezweckt. Durch die Pseudosprache sind beliebige Plausibilisierungen möglich, so dass eine optimale Trackinitialisierung für alle Teilbereiche des Sichtfeldes definiert werden kann.

### 4.3 Zustandsschätzung

Aufgrund der Nichtlinearität des Bewegungsmodells aus Gleichung (3) kommt für das Tracking ein erweitertes Kalmanfilter zum Einsatz. Das Umschalten zwischen den Bewegungsmodellen erfolgt auf Basis der Zielgeschwindigkeit. Die Schätzgleichungen des erweiterten Kalmanfilters mussten für die Berücksichtigung der Multi-Konturfähigkeit erweitert werden. Hierbei wird im Folgenden davon ausgegangen, dass sowohl für alle getrackten Konturpunkte als auch für die gemessenen je eine einheitliche Unsicherheit gelte, so dass die Innovationskovarianzmatrix nur einmal berechnet und im Rahmen des Kalmanfilters nur einmal invertiert werden muss.

Für die Messungen ist diese Annahme näherungsweise erfüllt, wenn man die Ausdehnung der Objekte und die Einflüsse der unterschiedlichen Konturpunktpositionen auf die Transformation des Messrauschens vernachlässigt. Für die Track-Konturpunkte gilt dasselbe, sofern diese immer komplett durch den Sensor beobachtet werden (vollständige Datenzuordnung in Zuordnungsebene 2) und nicht einige Punkte als reine Prädiktion mitgeführt werden müssen. Da dies nicht immer der Fall ist, wird ein entsprechender Strafterm in der Systemrauschkovarianzmatrix  $\underline{\underline{Q}}$  eingeführt, so dass für eine unvollständige Ebene-2-Zuordnung die Unsicherheit aller Konturpunkte moderat ansteigt.

Durch diese Festlegung kann der Algorithmus des erweiterten Kalmanfilters umgestellt werden, so dass sich

$$\begin{aligned}
 \underline{x}_k(v+1|v) &= f(\underline{x}_k(v)) \\
 \underline{\underline{P}}(v+1|v) &= \underline{\underline{F}}^T \cdot \underline{\underline{P}} \cdot \underline{\underline{F}} + \underline{\underline{Q}} \\
 \underline{s}_{k,l}(v+1) &= \underline{y}_l(v+1) - h(\underline{x}_k(v+1|v)) \\
 \underline{\underline{S}}(v+1) &= \underline{\underline{H}} \cdot \underline{\underline{P}}(v+1|v) \cdot \underline{\underline{H}}^T + \underline{\underline{R}} \\
 \underline{\underline{K}}(v+1) &= \underline{\underline{P}}(v+1|v) \cdot \underline{\underline{H}}^T \cdot \underline{\underline{S}}(v+1)^{-1} \\
 \underline{r}_{k,l}(v+1) &= \underline{K}(v+1) \cdot \underline{s}_{k,l}(v+1)
 \end{aligned} \tag{13}$$

ergibt. Hierbei ist  $\underline{x}_k$  der Zustandsvektor des Tracks bezüglich Konturpunkt k,  $f(\underline{x})$  die nichtlineare Systemtransferfunktion,  $\underline{P}$  die gemeinsame Kovarianzmatrix des Zustandsvektors für alle Konturpunkte,  $\underline{F}$  die Jacobimatrix der Systemtransferfunktion,  $\underline{Q}$  die Systemrauschkovarianzmatrix inklusive Strafterm,  $\underline{s}_{k,l}$  der Innovationsvektor bei Betrachtung der Zuordnung von Track-Konturpunkt k zu Sensor-Konturpunkt l,  $\underline{y}_l$  der Messvektor des Sensorobjekts bezüglich Konturpunkt l,  $h(\underline{x})$  die nichtlineare Systemausgangsfunktion,  $\underline{S}$  die resultierende Innovationskovarianzmatrix,  $\underline{H}$  die Jacobimatrix der Systemausgangsfunktion,  $\underline{R}$  die für alle Messkonturpunkte gemeinsame Rauschkovarianzmatrix,  $\underline{K}$  die Kalmanverstärkung und  $\underline{r}_{k,l}$  der Korrekturvektor für Konturpunkt k ist bei einer Aktualisierung durch den gemessenen Konturpunkt l.

Die Aktualisierung für jeden Konturpunkt kann ausgeführt werden, in dem die ersten beiden Komponenten des zugehörigen Vektors  $\underline{r}_{k,l}$  auf den prädierten Schätzwert aufaddiert werden. Für eine Aktualisierung der gemeinsamen Konturpunktsgeschwindigkeit, Beschleunigung, des Kurswinkels sowie der Kurswinkelgeschwindigkeit wird zunächst der Mittelwert von Vektor  $\underline{r}_{k,l}$  über alle Stufe-2-Zuordnungen berechnet,

$$\underline{r}_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{k,l=1}^N \underline{r}_{k,l}, \quad (14)$$

wobei N die Anzahl der gefundenen Zuordnungen ist. Eine Addition der letzten vier Elemente von Vektor  $\underline{r}_{mean}$  bzw. der letzten zwei im Falle des reduzierten Bewegungsmodells zu den korrespondierenden Elementen des bestehenden Objekt-Zustandsvektors schließt den Aktualisierungsvorgang ab.

## 5 Kombination von objekt- und ortsbasierter Kartendarstellung

Problematisch bleibt im objektbasierten Umfelderkennungssystem der planare Charakter der eingesetzten Sensoren. Die Lasersysteme weisen zwar einen vertikalen Öffnungswinkel von ca. drei Grad auf, um kleinere Nickbewegungen der Karosse zu kompensieren, für größere Nickwinkel oder stärkere Bodenwellen vor dem Fahrzeug ist dies jedoch nicht ausreichend, so dass entsprechende Fehlziele in das Trackingsystem eingebracht werden. Die im Pretracking durchgeführte Plausibilisierung der Messdaten kann diese Effekte nicht wirkungsvoll unterdrücken, da es sich nicht um temporäre sondern um systematische Messfehler handelt, die beide Lasersysteme betreffen. Die entstehenden Geisterziele im Trackingsystem führen wiederum zu Ausweichbewegungen durch die übergeordnete Bahnplanung, was es zu verhindern gilt.

An dieser Stelle kann durch eine Kombination mit der ortsbasierten Befahrbarkeitsanalyse die Leistungsfähigkeit der objektbasierten Umfeldmodellierung gesteigert werden.

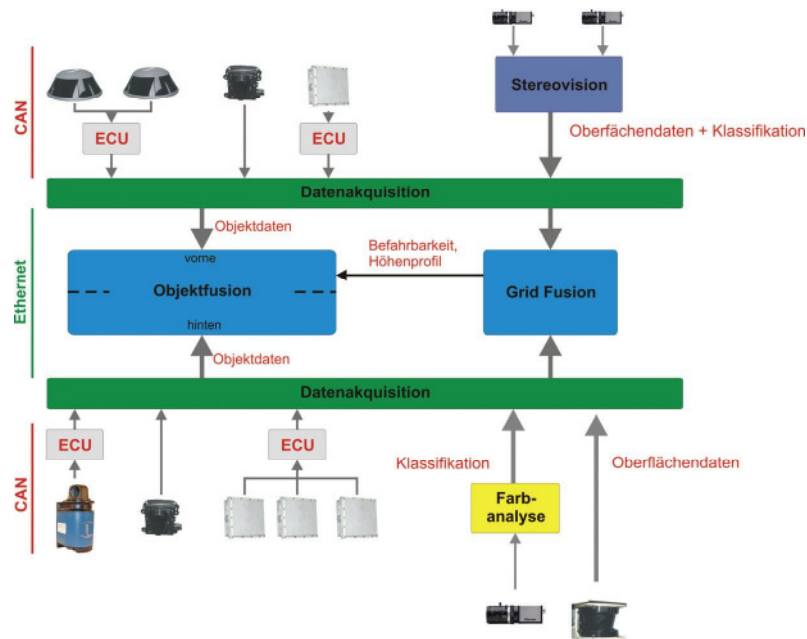


Abbildung 8: Gesamtarchitektur Umfelderfassung

Die Ergebnisse der Befahrbarkeitsanalyse sowie die von Laserscannern und Stereokamera erstellte Höhenkarte werden an das objektbasierte Teilsystem übermittelt (Abbildung 8) und dann für eine weitere Plausibilisierung der Messdaten herangezogen. Die Messobjekte der Sensoren werden unter Berücksichtigung der Fahrzeugnick- und Wankwinkel ins erdfeste Koordinatensystem transformiert und die erhaltenen Positionen mit Höhenkarte und Befahrbarkeitsanalyse abgeglichen. Liegt ein Messobjekt dabei in oder sogar unterhalb der entsprechenden Werte in der Höhenkarte und ist das Gebiet an dieser Stelle dennoch als befahrbar gekennzeichnet, so kann von einer unerwünschten Bodenreflexion ausgegangen werden, was dann im Rahmen der Trackinitialisierung entsprechend berücksichtigt wird. Auf diese Weise können die durch den planaren Charakter der Sensorik verursachten Einschränkungen im Rahmen des Beobachtungsbereiches der Befahrbarkeitsanalyse zumindest abgemildert werden, was zu einer Reduktion der für die Fahrzeugführung irrelevanten Fehlziele führt. Insbesondere für einen Einsatz in bergigem Gelände, wie im Rahmen der Urban Challenge teilweise vorgefunden, führt dies zu einer deutlichen Verbesserung der Fahrleistungen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde das Umfelderfassungssystem des Urban Challenge Fahrzeugs der TU-Braunschweig vorgestellt. Das System ist als hybride Lösung in eine objektbasierte und ortsbasierte Umfeldmodellierung aufgeteilt, um die Vorteile beider Ansätze für die Fahrzeugführung nutzbar zu machen. Als Schwerpunkt dieses Beitrags wurde das objektbasierte Teilsystem beschrieben, das auf Basis klassischer Trackingansätze entstanden ist. Das zugrunde liegende Objektmodell wurde für eine Beschreibung komplexer Strukturen im urbanen Umfeld angepasst und durch eine Freiform-Polygondarstellung beschrieben. Ein serieller Datenfusionsansatz auf Basis des Extended Kalmanfilters unter Verwendung zweier Bewegungsmodelle (Switched Model Kalmanfilter) wird verwendet, um aus den redundanten Messdaten der Sensoren ein einheitliches, objektbasiertes Umfeldmodell zu erzeugen. Die Algorithmen des Kalmanfilters wurden an die Freiform-Modellierung der Objektprimitive angepasst, um eine Realisierung in Echtzeit zu ermöglichen. Eine

Kombination mit dem ortsbasierten Teilsystem zur Fahrbereichsanalyse wird ferner verwendet, um unerwünschte Bodenreflexionen durch die Lasersysteme im Bereich von Geländeabschnitten mit starken Gefälleunterschieden auszublenden. Das System bildet gemeinsam mit der Fahrbereichsanalyse die Basis der Umfelderkennung des Urban Challenge Versuchsfahrzeugs, dass im Rahmen der Wettbewerbsteilnahme im November 2007 seine Leistungsfähigkeit durch die Finalteilnahme unter den besten elf Teilnehmern des ursprünglich über 100 Wettbewerber umfassenden Feldes bewiesen hat.

Einige Verbesserungen sind dennoch für die weiteren Forschungsaktivitäten wünschenswert. Eine weitergehende Kombination von objekt- und ortsbasierter Umfeldmodellierung ist vielversprechend, da mit bestehenden Sensorsystemen aufgrund der Vielzahl eingehender Falschmessungen das Objektmodell oft keine optimale Lösung darstellt und die Messdaten im Rahmen der Datenzuordnung und Trackinitialisierung nicht eindeutig zugewiesen werden können. Der statistische Charakter der Messdaten bezüglich deren Existenzwahrscheinlichkeit ist im Objektmodell nicht modellierbar, so dass auch eine Quantifizierung der Existenzwahrscheinlichkeit der modellierten Ziele in der künstlichen Fahrzeugumgebung schwer fällt. Das probabilistische Umfeldmodell der ortsbasierten Darstellung eröffnet hier eine neue Dimension, so dass eine direkte Kostenfunktion für das Befahren des Umfeldes unter Berücksichtigung unscharfer Sensordaten erfolgen kann. Eine Kombination beider Verfahren, beispielsweise durch die Definition lokaler ortsbasierter Kartendarstellungen um die Ziele des objektbasierten Ansatzes könnte hier die Vorteile beider Verfahren geeignet kombinieren. In der Fernlösung ist auch die Weiterentwicklung dynamischer ortsbasierter Karten interessant, deren Umsetzung zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch an der Realisierbarkeit im Echtzeitbetrieb scheitert. Für die Modellierung der Objektbeschreibung auf Basis der Freiform-Konturen gilt es, aus den zur Verfügung stehenden Konturdaten weitere Zielklassifikationen abzuleiten (z.B. Pkw, Lkw etc.), was beispielsweise durch Fusionierung zusätzlicher Bildverarbeitungssysteme erfolgen kann. Weiterhin ist die Stabilisierung der Konturmerkmale über die Beobachtungsdauer durch die Sensorsysteme hinaus von Interesse, so dass eine Kombination der klassischen Objektprimitive und der Freiformmodellierung interessant erscheint. Mit Hilfe der stabilisierten Konturpunkte, die durch die Verfahren dieses Beitrags erhalten werden ließen sich unter Verwendung einer Primitivdatenbank im Zuge einer erweiterten Form-Klassifikation entsprechend stabile Merkmale gewinnen.



- 
- <sup>1</sup> S. Thrun, W. Burgard, D. Fox, *Probabilistic Robotics*, The MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2005.
- <sup>2</sup> D. Stueker, *Heterogene Sensordatenfusion zur robusten Objektverfolgung im automobilen Straßenverkehr*, Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg, DE, 2004.
- <sup>3</sup> J.-C. Becker, *Fusion der Daten der objekterkennenden Sensoren eines autonomen Straßenfahrzeugs*, Dissertation, TU-Braunschweig, Braunschweig, DE, 2002.
- <sup>4</sup> C. Baker, Z. Omohundro, S. Thayer, W. Whittaker, M. Montemerlo, S. Thrun, *A case study in robotic mapping of abandoned mines*, Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics, Lake Yamanaka, Japan, 2003.
- <sup>5</sup> K. Sentz, *Combination of Evidence in Dempster-Shafer Theory*, Ph.D. Thesis, Thomas J. Watson School of Engineering and Applied Science, Binghamton University, 2002.
- <sup>6</sup> Y. Bar-Shalom, *Estimation and Tracking*, Artech House, 1993.
- <sup>7</sup> Y. Bar-Shalom, *Update with Out-of-Sequence Measurements in Tracking: Exact Solution*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol 38, No 3, pp. 769-778, 2002.
- <sup>8</sup> Y. Bar-Shalom, *Multitarget-Multisensor Tracking: Advanced applications*, Artec House, 1990.